

学校编码: 10384

分类号____密级____

学号: 32020101152682

UDC____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

用于涡流检测仿真的分解区域混合有限元法

Domain Decomposition Hybrid Finite Element Method for

Eddy Current Testing Simulation

陈建民

指导教师姓名: 曾志伟 教授

专 业 名 称: 航空宇航制造工程

论文提交日期: 2013 年 6 月

论文答辩日期: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 6 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

时至今日，飞机已经成为一种重要的交通工具，其安全性备受关注。在飞机诸多零件中，蒙皮等多层结构占据其中的绝大部分。考虑到经济和效率等因素，利用涡流检测对飞机蒙皮进行无损检测是检测人员常用的方法。目前很多研究人员在努力提高涡流检测的精度和效率。

利用计算机对涡流检测进行仿真具有设备简单，研究成本低，研究方法灵活等优势。对涡流检测进行高效仿真主要取决于计算机性能和算法效率。与过去相比，如今的计算机硬件技术已发展至较高水平。但是当计算规模较大时，一般的计算机也难以胜任，此时提高算法效率更为重要。分解区域有限法将复杂的求解域离散为若干个子域，通过求解子域问题的解，进而利用子域间的相互作用关系反复迭代得到所需求解域的解。与传统单一求解区域方法相比，该方法提高了网格剖分的灵活性和计算效率。在此基础上，本文提出分解区域混合有限元法，在各个子域根据实际情况选择涡流表述进行求解，提高位函数使用的灵活性，进一步提高仿真效率。

作者建立涡流检测的仿真模型，利用 Fortran 语言编写计算程序，实现涡流检测仿真。首先对磁芯探头固定点检测不同铝板的情况进行三维仿真，将求解区域分解为分别包含铝合金蒙皮和探头磁芯的两个子域，在两个子域上分别采用 T - Ω 表述和 A_r - V - A_r 表述进行计算。其中， T 是电矢量位， Ω 是磁标量位， A_r 是简化磁矢量位， V 是电标量位。 T - Ω 表述的优点是待解未知量少； A_r - V - A_r 表述的优点是可以避免前者涉及铁磁材料的对消误差。将计算结果与单纯使用 A_r - V - A_r 表述的分解区域有限元法的计算结果比较，验证分解区域混合有限元法的高效性。然后利用分解区域混合有限元法对有孔的铝板进行扫描检测的仿真。

本文提出的分解区域混合有限元法是对分解区域有限元法的发展，大幅提高三维有限元分析的效率，使计算机仿真更好地服务于涡流检测研究和培训。

关键词：涡流检测；计算机仿真；分解区域混合有限元法

Abstract

Nowadays, aircraft has become a kind of important transportation tool, and its safety is of great concern. Skin and other multi-layer structures are dominant components in aircraft. Taking into account economy and efficiency, maintainers often use eddy current testing (ECT) to inspect aircraft skin. At the moment, many researchers make great efforts to improve the accuracy and efficiency of ECT.

Computer simulation of ECT has advantages of low cost and flexibility. The efficiency of simulation mainly depends on the performance of computer and the efficiency of algorithm. Compared with the past, computer hardware technology has developed to a high level. Nonetheless, personal computers still fail in handling very large and complicated models. Therefore improving the efficiency of simulation algorithm is critical. Domain decomposition finite element method (DDFEM) decomposes complicated computation task into subtasks on subdomains, and thus improves the flexibility of mesh generation and the efficiency of simulation. Based on this, the paper proposes domain decomposition hybrid finite element method (DDHFEM), and chooses potential formulations for specific subdomains in order to further improve simulation efficiency.

A model for ECT simulation is set up and the corresponding Fortran program is developed. This paper simulates fixed-point detection of various aluminum plates using ferrite-core probe. The solution domain is decomposed into two subdomains, one covering the aluminum plates and the other covering the ferrite core. The \mathbf{T} - Ω formulation and the \mathbf{A}_r - V - \mathbf{A}_r formulation are used in the subdomains, respectively. Here, \mathbf{T} , Ω , \mathbf{A}_r , and V stand for electric vector potential, magnetic scalar potential, reduced magnetic vector potential, and electric scalar potential, respectively. By comparing the result of the proposed DDHFEM with that of DDFEM using only the \mathbf{A}_r - V - \mathbf{A}_r formulation, we conclude that DDHFEM is much more efficient. Then DDHFEM is used to simulate the scanning detection of aluminum plate with

through-hole using ferrite-core probe.

The proposed DDHFEM improves the efficiency of three-dimensional finite element analysis greatly and makes computer simulation serve better for ECT research and training.

Key words: Eddy current testing; Computer simulation; Domain decomposition hybrid finite element method

厦门大学博硕士论文摘要库

中文摘要	I
英文摘要	II
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 无损检测的概念及在飞机维修中的应用	1
1.1.2 涡流检测在飞机蒙皮无损检测中的应用	2
1.1.3 涡流的模拟仿真	4
1.1.4 课题研究意义	4
1.2 计算电磁学的发展及应用	5
1.2.1 计算电磁学的概念及发展	5
1.2.2 电磁场数值分析方法及应用	7
1.3 涡流有限元分析的国内外研究进展	10
1.4 本论文的主要工作及内容安排	14
第二章 电磁场理论	16
2.1 麦克斯韦方程组	16
2.2 界面条件和边界条件	17
2.2.1 不同媒介的分界面条件	17
2.2.2 场域的边界条件	19
2.3 涡流场的位函数表述	19
2.3.1 $A, V-A$ 表述	19
2.3.2 $A_r, V-A_r$ 表述	22
2.3.3 $T-Q$ 表述	24
第三章 有限元模型的建立	28
3.1 有限元法的基本思想和优点	28
3.2 伽辽金有限元法简介	28

3.3 使用 $A_r, V-A_r$ 表述对三维正弦涡流场问题的伽辽金有限元离散化	31
3.4 使用 $T-\Omega$ 表述对三维正弦涡流场问题的伽辽金有限元离散化	37
第四章 分解区域计算方法	43
4.1 分解区域方法的计算思想	43
4.2 基于 $A_r, V-A_r$ 表述的分解区域有限元法	44
4.3 分解区域混合有限元法	45
4.4 程序设计	46
4.4.1 分析程序设计	46
4.4.2 程序收敛判据	46
第五章 计算结果	48
5.1 问题描述	48
5.2 磁芯探头固定点检测完整铝板	49
5.3 磁芯探头固定点检测有孔铝板	53
5.4 磁芯探头固定点检测有孔有缺陷铝板	55
5.5 磁芯探头扫描有孔铝板	58
第六章 总结和展望	63
6.1 本文总结	63
6.2 展望	63
参考文献	65
攻读硕士期间发表的论文	70
致谢	71

Table of Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English.....	II
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background of Research	1
1.1.1 Concept of Nondestructive Testing and Application in Aircraft Maintenance	1
1.1.2 Application of Eddy Current Testing in Aircraft Skin Inspection.....	2
1.1.3 Simulation of Eddy Current	4
1.1.4 Significance of Research.....	4
1.2 Development and Application of Computational Electromagnetics	5
1.2.1 Concept and Development of Computational Electromagnetics	5
1.2.2 Numerical Analysis Methods of Electromagnetic Field and Applications ...	7
1.3 Development of Finite Element Analysis of Eddy Current	10
1.4 Main Work and Contents	14
Chapter 2 Theory of Electromagnetic Field	16
2.1 Maxwell's Equations.....	16
2.2 Interface Conditions and Boundary Conditions	17
2.2.1 Interface Conditions.....	17
2.2.2 Boundary Conditions	19
2.3 Formulations for Eddy Current Field.....	19
2.3.1 $A, V-A$ Formulation.....	19
2.3.2 $A_r, V-A_r$ Formulation	22
2.3.3 $T-\Omega$ Formulation	24
Chapter 3 Establishment of Finite Element Model	28
3.1 Basic Idea and Advantages of Finite Element Method.....	28
3.2 Introducton to Galerkin Finite Element Method.....	28
3.3 Discretization of 3-D Sinusoidal Eddy Current Problems using $A_r, V-A_r$ Formulation	31

3.4 Discretization of 3-D Sinusoidal Eddy Current Problems using T - Ω Formulation	37
Chapter 4 Domain Decomposition Method	43
4.1 Idea of Domain Decomposition Method	43
4.2 Domain Decomposition Finite Element Method Based on $A_r V$ - A_r Formulation	44
4.3 Domain Decomposition Hybrid Finite Element Method	45
4.4 Program Design	46
4.4.1 Design of Analysis Program	46
4.4.2 Criterion of Convergence	46
Chapter 5 Computation Results	48
5.1 Problem Description	48
5.2 Fixed-Point Detection of Intact Aluminium Plate using Ferrite-core Probe	49
5.3 Fixed-point Detection of Aluminium Plate with Through-hole using Ferrite-core Probe	53
5.4 Fixed-point Detection of Aluminium Plate with Through-hole and Flaw using Ferrite-core Probe	55
5.5 Scanning Detection of Aluminium Plate with Through-hole using Ferrite-core Probe	58
Chapter 6 Summary and Prospection	63
6.1 Summary	63
6.2 Prospection	63
References	65
Appendix	70
Acknowledgement	71

第一章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 无损检测的概念及在飞机维修中的应用

无损检测（Nondestructive Testing 或 NDT）技术是在不破坏被检测对象，不影响其使用性能的条件下，凭借热、声、光、电、磁等物理条件，对各种工程材料、零部件、结构件内部结构异常或者缺陷进行有效的定性定位定量的判断和评价^[1]。

无损检测技术是自二战以后迅速崛起的一门新兴工程科学。随着计算机和新材料的普及和发展，无损检测技术也得到了快速的发展。到了 20 世纪中期^[2]，完整的无损检测体系基本建立起来，主要包含磁粉检测、渗透检测、超声检测、射线检测和涡流检测五大常规方法。由于无损检测技术具有不损坏被检物的使用性能的特性，在工业生产、在役检验、物理研究、生物工程等广大领域得到了广泛的应用。无损检测的主要目的是质量管理、质量鉴定、在役检测、无损评价，其主要内容包括检测缺陷、测试材料的机械或者物理性能、评估产品性质和状态、度量产品几何尺寸、监控运行设备安全以及评估产品的安全寿命^[3]。总的来说，无损检测是对产品、构件的完整性、可靠性、使用性能等的综合评价。

作为航空维修的一种手段，无损检测伴随着航空维修的发展而发展，它对控制飞机和发动机零件质量，保证飞机安全飞行具有非常重要的意义。在飞机维修领域，无损检测已经从最初的检测飞机零部件阶段发展到现在对飞机、发动机零件的安全使用寿命进行全面评价。随着国家对航空业的重视，航空维修手段将得到不断提高，无损检测也将愈来愈受到重视。从一定程度上说，无损检测的发展水平反映了航空维修的发展水平^[4]。

对老龄飞机进行无损检测是无损检测技术在航空领域的一个重要应用。对老龄飞机进行“体检”，能大大降低老龄飞机发生故障的概率，从而延长其日历寿命。目前，我国已经对老龄飞机的无损检测制定了相应的探伤工艺。在此基础上，检修人员又会对特定的机型补充附加的检测项目。

无损检测技术在航空领域的另一个重要应用是对新型航空材料的检测。随着

科技的发展和人们对“具有特殊性能材料”需求的增加，以钛合金和复合材料为代表的新型材料日益向航空领域扩展。例如，美国波音公司研制的 Boeing777，其复合材料用量已经达到 9.9 吨，占总重的 11%^[5]，而 Boeing787 中复合材料的比重则高达 50%以上。可以说，在航空领域大量使用复合材料已经是一种趋势，在这一背景下，对复合材料进行无损检测也就变得尤为重要。目前，阵列涡流检测^[6]、相控超声检测^[7]等技术已经被用于新型航空材料的检测。

除了以上所提及的应用，无损检测还能应用于监测飞机的腐蚀情况和疲劳裂纹^[4]。飞机的腐蚀和疲劳裂纹的发展都是动态过程。利用传统的超声和涡流检测技术，以及新兴的红外热成像技术和声发射检测技术都能对这一动态过程进行有效的监测。

1.1.2 涡流检测在飞机蒙皮无损检测中的应用

涡流检测是建立在电磁感应原理基础上的一种无损检测方法。涡流检测方法以导电材料为检测对象。当导体置于交变磁场中，导体中就会有感应电流产生，这种电流被称为涡流。导体自身各种因素（如电导率、磁导率、形状、尺寸、缺陷等）的变化会导致感应电流的变化。利用这种现象来判断导体性质、形状以及有无缺陷的检测方法叫做涡流检测方法^[8]。涡流检测原理如图 1.1.2 所示。把加载了交变电流的线圈放置在被检测工件附近，在交变电流的作用下，线圈会产生交变磁场，使得检测工件中感应出交变电流。值得注意的是，如果在激励电流的参数、探头提离高度均不变的前提下，涡流的幅值、相位等参数就只和被检测工件本身的导电性能有关系。而由于受到涡流磁场的反作用，线圈的阻抗也随之发生变化。因此，通过对线圈上的感应信号（即阻抗变化）的测定，便可判断被检工件是否存在缺陷。

涡流具有趋肤效应，即涡流的电流密度在导体表层达到最大，并随着距离表面深度的增加而衰减。一般的，我们用趋肤深度来描述趋肤效应的大小。趋肤深度是指，涡流的电流密度衰减到表层电流密度的 $1/e$ （约 37%）时的深度。趋肤深度和涡流的频率、导体的属性有着密切的关系，其数学表达式如下：

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\omega\mu\sigma/2}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}} = \frac{503}{\sqrt{f\mu_r\sigma}} \quad (1.1.1)$$

式中， δ 是趋肤深度，单位是 m（米）； ω 是角频率，单位是 rad/s（弧度/秒）； f

是频率，单位是 Hz（赫兹）； μ 是磁导率，单位是 H/m（亨特/米）； σ 是电导率，单位是 S/m（西门子/米）； μ_r 是相对磁导率。

在利用涡流检测系统检测工件前，应事先设置交变电流的频率和幅值，探头的形状、尺寸及提离工件表面的高度。以上参数如果发生变化将会影响到导体区域涡流的分布情况。预先设定合适的参数能达到充分利用探头性能，确保检测精度和灵敏度的目的。

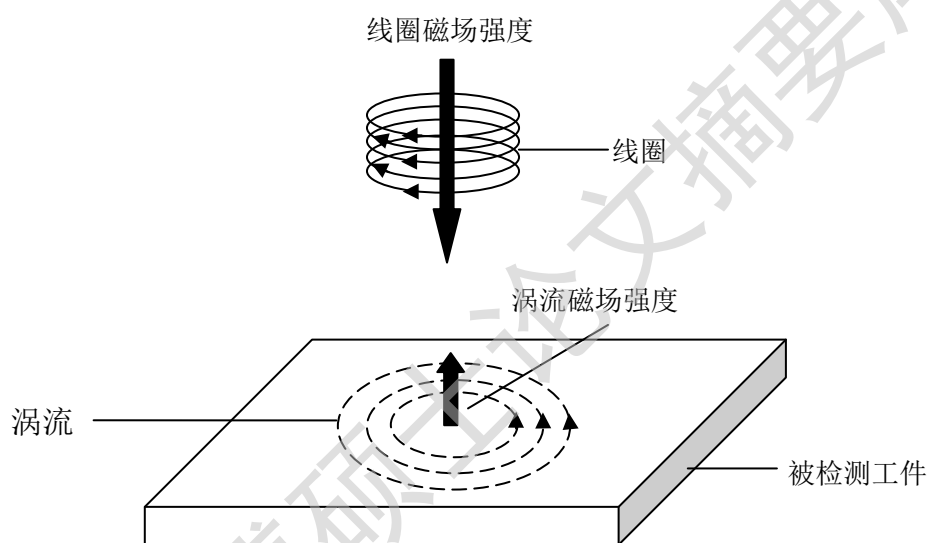


图 1.1.2 涡流检测原理图

与射线、超声、磁粉、渗透检测方法相比，涡流检测技术具有以下优点：

- (1) 不需要耦合剂，与被检测工件即可接触又可接触。
- (2) 易于实现对管、棒、线材等细长结构的自动化检测。
- (3) 不受环境影响，能在高温等极端条件下工作。
- (4) 能测量多种信息，如金属导电率、磁导率、裂纹等，并可用于监控疲劳裂纹。
- (5) 操作简便，检测效率高。
- (6) 易于存储和比较检测数据。

因此，涡流检测技术在机械制造、电力生产、建筑工程、水利管理等诸多行业得到了广泛的应用。

飞机蒙皮是维持飞机外在形状，使得飞机在飞行中具有良好的空气动力特性

的一层硬质铝合金。在飞行过程中,飞机蒙皮将受到来自空气阻力的作用力,并将作用力传递到与之相互连接的机身机翼的骨架上。在飞机机体关键结构中,由蒙皮、梁和缘条组成的多层结构占据了 80%以上^[9]。因此,飞机蒙皮的完整性在飞机安全飞行中起着至关重要的作用,而对飞机蒙皮的检测工作也变得意义重大。

使用涡流检测方法对飞机蒙皮进行无损检测已经取得了很大的成功。例如,对于飞机蒙皮多层结构的问题,何赟泽等人利用脉冲涡流技术对老龄飞机多层结构中的内层结构进行检测,通过处理实验中的微弱检测信号,得到了飞机多层结构内层裂纹缺陷的信息,验证了脉冲涡流技术在飞机多层结构中检测缺陷的可行性^[10]。海军航空工程学院的袁英民等人利用低频涡流检测方法成功区分飞机蒙皮中不同层的缺陷^[11]。在飞机蒙皮的涡流检测中,涡流阵列检测技术以易于实现,易于观测结果,以及检测迅速的优点被广泛应用。付小强等人使用涡流阵列检测仪成功检测到飞机蒙皮内部深埋的缺陷并且确定了损伤的部位、程度以及在蒙皮结构中深埋的位置^[12]。

1.1.3 涡流的模拟仿真

计算机仿真技术是基于多学科知识,利用计算机及其软件为工具,通过虚拟实验方法来分析并解决问题的一门综合性技术^[13]。20 世纪 80 年代以来,计算机技术的飞速发展和人们对计算方法的深入研究使计算机仿真技术日趋成熟。

利用计算机对涡流检测进行模拟仿真能够得到不带噪声的检测信号,求解电磁场逆问题,优化检测系统,科学指导检测工作,而且还能对检测人员进行理论培训。而这是建立在对电磁场准确仿真的基础上的。因此,如何对电磁场进行高效和准确的计算也就变得极为重要。

1.1.4 课题研究意义

飞机作为重要的交通运输工具,其安全性经常为人们所关注。考虑到检测成本,如何经济地解决飞行安全问题仍然是世界性的难题。飞机蒙皮的完整性是影响飞机安全的一个极其重要因素。许多科研人员一直致力于实现高效率、高准确率的蒙皮检测。但是受检测的地点、时间和设备等客观条件的影响,对蒙皮检测的各种方法还有待发展完善。

涡流检测是检测飞机蒙皮的一种重要无损检测手段,在保障飞机安全方面发

挥了日益重要的作用。对于蒙皮铆钉连接处的裂纹和蒙皮的腐蚀损伤，涡流检测都具有不错的检测效果。

利用计算机对涡流电磁场的准确仿真有助于培训检测人员，优化检测系统。在涡流分析中，最主要的计算方法是有限元法。比较流行的涡流仿真软件有 ANSYS、COMSOL 等，这些软件均能实现较高精度的涡流数值仿真。但是，这些软件都是基于同一个求解区域的，即将所有物体放在同一个求解区域来计算电磁场量。对于尺寸较大，成分复杂的工程问题，这样的求解方式会导致网格剖分难度变大，占用内存增加，求解难度增大的问题，最终导致仿真效率偏低。

虽然计算机仿真能带来诸多好处，但在涡流检测研究中还未被广泛采纳。要在涡流检测研究中推广计算机仿真，除了要求计算结果准确，还要求模型适用范围广，计算效率高。二维或轴对称模型可以很快地得到计算结果，但应用范围非常有限。三维模型原则上可以对任意的涡流检测问题进行模拟，但计算效率往往很低，即占用很大的计算机内存空间，又运行很长时间。这使得很多涡流检测研究人员对其失去兴趣。因此提高三维数值分析的效率是非常有意义的。

本课题在国内外学者的研究工作的基础上，提出一种新的、高效的涡流计算方法。该方法特别适合于仿真带有磁芯探头扫描的涡流检测。

1.2 计算电磁学的发展及应用

1.2.1 计算电磁学的概念及发展

计算电磁学 (Computational Electromagnetics) 是一门基于电磁场理论，以高性能计算技术为手段，运用计算数学提供的各种方法，用以解决复杂的工程问题的新兴的边缘交叉学科，是电磁学中一个十分活跃的研究领域。

计算电磁学在 20 世纪 40 年代被提出，但其蓬勃发展却始于三四十年前。涡流场的数值分析一直是计算电磁学中的热门领域之一。三十多年来，伴随着计算电磁学的发展，科研人员对涡流场的数值分析进行了细致的研究。电磁场的计算是在电磁理论的指导下进行的，而电磁理论的发展大致可以分为两个阶段：20 世纪 60 年代以前的经典电磁学阶段和 60 年代以后的计算电磁学阶段^[14]。在经典电磁学阶段，对于涡流等电磁场问题通常采用解析的方法进行求解。20 世纪 60 年代以来计算机技术的普及和快速发展以及软件技术的持续进步为现代计算电

磁学奠定了强大的基础,也形成了这一阶段计算电磁学的显著特征——依托计算机的高性能运算能力对各类复杂工程问题进行求解^[15]。现代电磁学以数值计算方法为工具,例如有限元法、有限差分法、矩量法等,能够很好地求解各类型的复杂电磁场问题。

对于求解尺寸较小,形状对称,边界规则的电磁场问题,采用解析解具有精度高和效率高的优点。但是随着现代电子和电气工业技术的发展^[16],科研人员需要对几何特征复杂的模型进行涡流仿真,解析方法遇到瓶颈,这时可以采用数值计算方法进行求解。与解析解相比,数值解受几何特征的影响较小,适合于求解复杂的工程问题。

近 40 年来,计算电磁学取得了许多重大的理论成果^[17],主要体现在以下几个方面:有限元法在求解电磁学领域得到了普及;电磁场和其他物理场的耦合问题研究取得了极大进展;开始对电磁场问题中涉及材料属性各向异性的情况进行研究;对电磁场逆问题的研究取得一定程度的进展。如今世界各地都会定期开展关于计算电磁学的学术活动,例如 PIERS (Progress in Electromagnetics Research Symposium)、COMPUMAG (Conference on the Computation of Electromagnetic Fields)、CEFC (IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation) 都是影响较大的国际性会议。同时,国际计算电磁学领域的专家和学者为了验证各种算法的有效性,提出了三十多个以相应工程问题为背景的基准模型例题,即 TEAM (Testing of Electromagnetic Analysis Method) Workshop 问题。另外,在著名的 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 的许多期刊上,每年都有许多关于计算电磁学的论文被发表。

计算电磁学不但取得了诸多理论成果,还被实际应用于各种与电磁场相关的领域。林溪波将时域有限差分法用于研究飞机天线辐射问题以及雷电所产生的电磁脉冲对飞机的影响^[18]。刘燕华等人将现代计算电磁学的最新成果运用到磁选机的磁系设计中,通过数值计算优化了磁系的结构参数,得到了精确的磁场分布,并将改进后的磁选机成功地运用到选煤领域^[19]。吴楠等人研究了舰船短波电磁环境,提出电大尺寸复杂平面电磁环境仿真的优化方案^[20]。K. Lu 等人研究了一种夹层结构金属板在不同板厚情况下对电磁辐射的屏蔽效果,通过计算和比较得出了屏蔽效果较好的金属板厚度^[21]。M. A. M. Cheema 等人则对变压器绕组在正弦

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库